

DLC박막을 코팅한 초경공구의 Al합금에 대한 절삭성능 향상

Improvement of Cutting Performance of DLC Coated WC against Al Alloy

이 규 용
K. Y. Lee

Key Words : Diamond Like Carbon (DLC) Films(유사다이아몬드박막); PIIBD(플라즈마 침적 이온선 증착법), Al Alloy(알루미늄 합금), Cutting Performance(절삭성능), WC Insert Tip(초경 인서트)

Abstract : Diamond-like-carbon (DLC) coatings could be good candidates as solid lubricants for cutting tools in dry machining of aluminum alloy. In this work, DLC thin films were produced as a friction reduction coating for WC-Co insert tip using the plasma immersion ion beam deposition (PIIBD) technique. DLC coatings were also coated on Al₂O₃ specimens and high temperature wear tested up to 400°C in dry air to observe the survivability of the DLC coating in simulated severe cutting conditions using a pin-on-disc tribotester with Hertzian contact stress of 1.3GPa. It showed reduced friction coefficients of minimum 0.02 up to 400°C. And cutting performance of DLC coated WC-Co insert tips to Al 6061 alloy were conducted in a high speed machining center. The main problems of built-up edge formation in aluminum machining are drastically reduced with improved surface roughness. The improvements were mainly related to the low friction coefficient of DLC to Al alloy and the anti-adhesion of Al alloy to WC due to the inertness of DLC.

1. 서 론

절삭 공구 산업에서는 건식가공의 실현을 위하여 고내마모성을 갖는 절삭 공구용 보호박막을 개발하기 위한 많은 기초적인 연구가 진행되고 있다.¹⁾ 특히 난삭재인 연질 알루미늄 합금의 절삭가공에서 발생하는 공구의 마모는 크게 피삭 재료의 공구선단에서의 Micro접합으로 인한 절삭공구 끝의 구성인선(Built up edge) 생성에 그 원인이 있으며 이것이 발생하면 둔하게 된 절삭 공구에 의하여 가공면에 나쁜 영향을 크게 미친다.²⁻⁴⁾

이 경우 절삭 표면은 절삭의 물리적 현상으로 부터, 고온과 극심한 고압으로 인한 영향을 받는다고 알려졌다.⁵⁾ 세라믹이나 초경재료를 절삭공구로 사용할 경우 이와 같은 트라이볼로지적인 표면특성을 향상시키기 위해서는 유사 다이아몬드 박막(이하 DLC로 표기함)의 형성 시킬 수 있는 표면개질기술을 적용하는 것이 한 해결 방법이다. DLC 박막은

윤활물질 없이도 낮은 마찰특성을 나타내기 때문에 알루미늄 합금의 건식 절삭가공에 최적의 코팅재료로 적용되어 질 수 있다.⁶⁾

이는 낮은 마찰계수와 함께 코팅된 박막표면의 매끄러움과 고경도 그리고 화학적 불활성 등이 DLC 박막의 내마모성에 대한 관심을 크게 갖게 하는 요인들이다. 그러나 DLC 박막은 박막이 형성되는 과정에서 생성되는 높은 내부 압축 응력과 모재 재료와의 낮은 화학적 결합작용으로 인하여 접착력이 낮은 물성을 가지게 되므로 DLC 박막의 적용에 한계를 초래한다.

따라서 접착력, 열적안정성 그리고 DLC 박막의 강도를 극복하고 향상시키기 위하여 금속을 도핑한 DLC 박막개발에 대한 많은 연구가 진행되어오고 있다.⁷⁻⁸⁾ DLC 박막을 절삭공구에 적용한 연구들 중에는 후쿠이(Fukui)⁹⁾를 비롯한 몇몇 연구자들은 DLC 박막이 절삭공구의 성능을 향상시킨다^{6, 10-11)}는 연구결과를 보고한 반면 또 다른 연구자¹²⁾들은 DLC 박막을 코팅한 절삭공구의 절삭성능 향상에 아무런 효과가 없다는 결과를 발표하였다.

이는 DLC 박막의 서로 다른 코팅기술에 의하여 제조된 DLC 박막의 물성 등에 그 원인이 있는 것

접수일 : 2008년 5월 26일, 채택확정 : 2008년 6월 16일
이규용(책임저자) : 부경대학교 기계공학부
E-mail : kylee@pknu.ac.kr, Tel. 051-629-6127

으로 생각된다.

본 논문에서는 Al합금의 건식 절삭 가공을 위한 절삭 공구용 윤활 박막을 개발하기 위해 WC-Co 인서트 팁과 알루미나 세라믹에 플라즈마 침적 이온선 증착법¹⁾ (PIIBD)을 이용한 DLC 박막을 코팅하였다. DLC를 코팅한 Alumina disc와 WC-Co 인서트 시료들은 이들에 코팅한 DLC 박막이 절삭공구보호용으로 적당한지를 검토하기 위하여 고온을 포함한 환경적 영향과 높은 접촉압력, 그리고 높은 마찰부하로서 마모실험을 하였으며 또 절삭성능을 판단하기 위해 알루미늄 합금의 건식 절삭 가공에서의 코팅재의 고속 절삭을 실험하여 이에 대한 분석을 하였다.

2. 실험방법

2.1 시험편 및 DLC 코팅방법

DLC 박막은 PIIBD의 박막 코팅 시스템을 이용하여 중간층 형성과 DLC 코팅을 하였다. DLC 박막을 증착하기 위해 디스크형의 알루미나 시료와 WC 인서트 팁은 우선 3 keV의 에너지로 Ar이온 클리닝 후 접착력을 높이기 위하여 Si층을 PIIBD를 이용하여 증착하였으며 순차적으로 DLC 박막을 증착하였다. WC insert 시료들은 Al절삭 가공 전용의 산업용으로 생산되는 평균조도 0.5 μm의 경면으로 연마한 것을 사용하였다.

이러한 증착과정들은 동일한 챔버 내에서 시료를 인출하지 않은 채 진행하였으며 실리콘 웨이퍼에 코팅한 시료는 TEM이나 SEM 실험을 위하여 준비하였다.

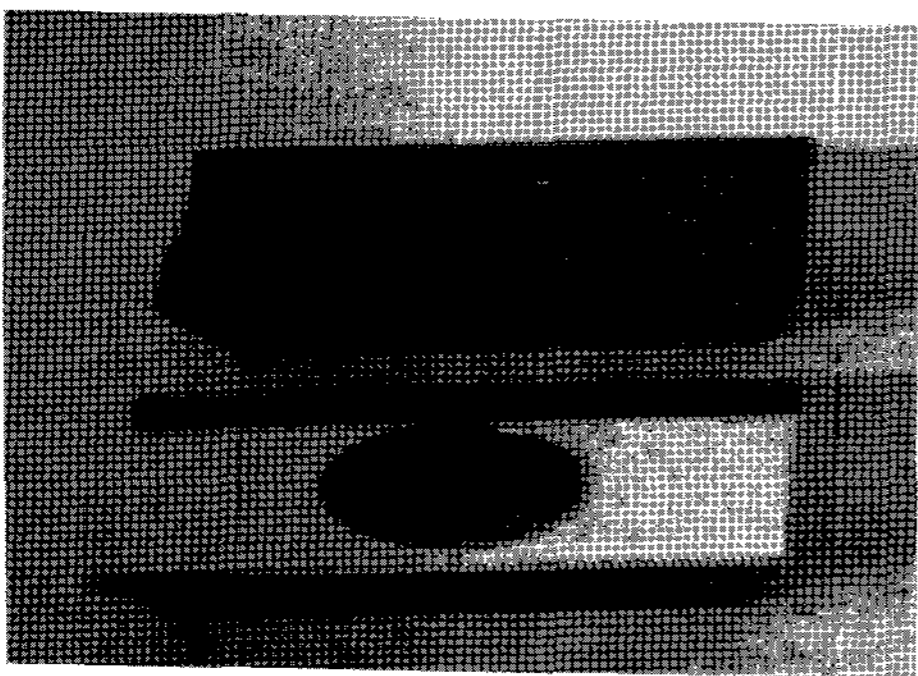


Fig. 1 DLC coated and uncoated WC insert tips for milling

Fig. 1에 DLC가 코팅된 인서트와 DLC 박막이 코팅되지 않은 WC-Co 인서트를 나타내었으며 증착

조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Deposition condition of DLC

Substrate	Interlayer Thickness	DLC Coating Precursor	DLC Thickness
WC-Co Al ₂ O ₃	400 nm	6Hr, Ar:H ₂ :CH ₄ =10:10:10 + 3Hr, C ₂ H ₂ =65	1.3 μm

2.2 박막특성 조사

코팅된 DLC 박막의 성분이나 구조분석을 위한 방법으로 실리콘 웨이퍼위에 DLC 박막을 코팅하고 그 단면을 TEM으로 분석하였으며 박막의 두께는 EDS가 장착된 SEM에 의한 원소분석으로부터 측정하였다.

2.3 마모실험과 절삭실험

2.3.1 고온마모실험

DLC 박막의 절삭성능은 기계 절삭 가공 동안 인서트 팁에 코팅된 DLC 박막이 받을 수 있는 환경을 고려하여 고온 pin-on-disc 실험 장치와 절삭력 측정 장치를 이용하여 실험하였다. 실험조건은 상온, 100 °C, 200 °C, 300 °C 그리고 400 °C 하에서 실시하였고 마찰력의 측정은 부하장치에 장착된 데이터 획득 시스템을 사용하여 지속적으로 측정 기록하였다. 이때 핀 재료로는 경면 연마된 직경 5 mm의 알루미나 세라믹 볼을 사용하였으며 디스크 시료는 경면 연마 ($R_a=0.5 \mu m$)된 직경 50 mm의 고순도 알루미나에 DLC 박막을 코팅하여 사용하였다. 또한 2.9 N의 부하를 가하여 초기접촉압력 1.3 GPa이 되게 고 응력을 가하였으며 모든 실험에서 미끄럼 속도는 0.1 m/s로 일정하게 하고 마모실험은 실온에서 1000 m 고온에서 500 m의 거리로 실시하였다.

2.3.2 알루미늄 합금에 대한 절삭성능시험방법

DLC 박막을 코팅한 WC 인서트 팁의 절삭성능 실험은 수직 머신 센터 (Vertical machining center)를 사용하여 Al-Mg 6061 합금재료에 대하여 하향 밀링으로 실시하였다. 실험에 사용한 모든 장치와 공구들은 공구시장에서 상업적으로 구입 가능한 품목들만을 선택하였다.

인서트 팁은 알루미늄 절삭전용의 WC(APET 160508PDFR-S, H10)가 사용되었으며, 이 모델은 예리한 절삭날과 절삭시의 구성인선 형성의 최소화

를 위하여 측면을 포함한 절삭면 전체가 경면가공이 되어 있어 주로 알루미늄 절삭전용으로 쓰이는 것이다. 선택된 인서트 홀더는 25 mm직경에 슬릿 2개의 것을 사용하였지만 절삭력이나 인서트 팁의 분석을 용이하게 하기 위하여 한 개의 슬릿만을 사용하였는데 플라잉 커터(Flying cutter)의 효과가 있어 정상절삭보다 가혹한 절삭조건으로 실험하였다.

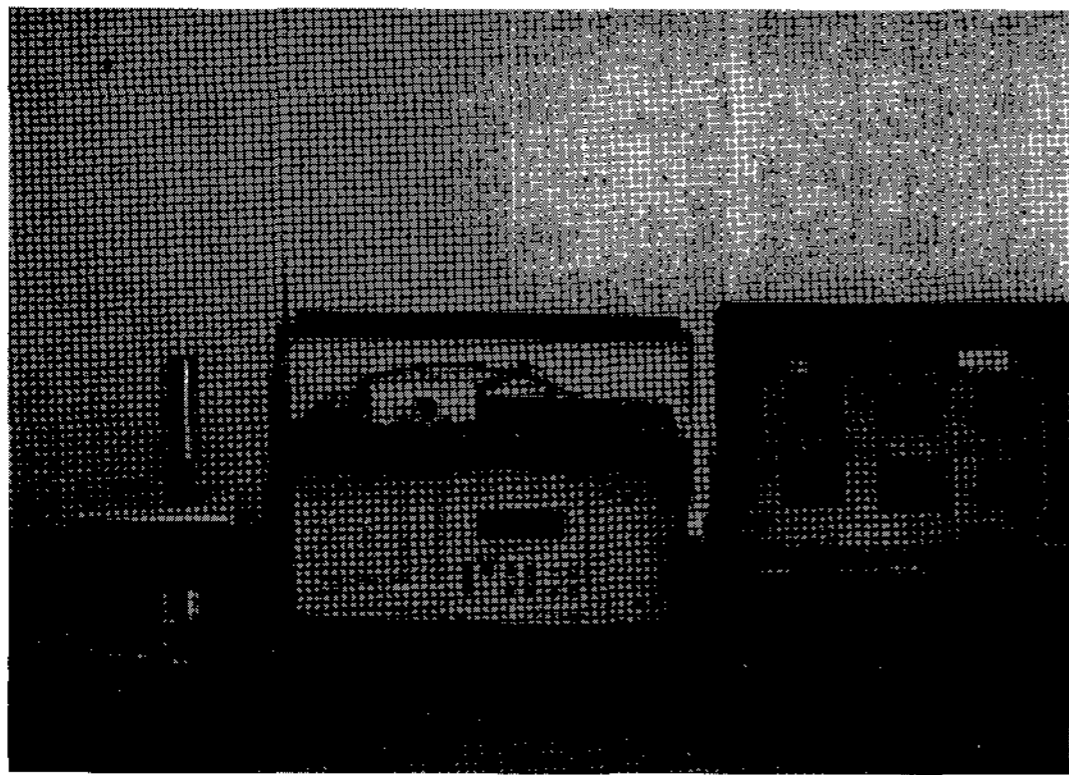


Fig. 2 Milling work piece and tool dynamometer

절삭저항 측정은 Fig. 2의 4방향 피에조(Piezo)타입 절삭동력계(KISTLER -Type 5019)를 사용하였으며 절삭실험 후 DLC 박막분석과 빌트 업 에지의 생성현상을 관찰하기 위해 DLC 박막이 코팅된 인서트 팁 과 DLC 박막이 코팅되지 않은 인서트 팁들의 절삭면을 SEM을 통하여 관찰하였으며 절삭실험 후 인서트 팁의 마모상태와 구성인선 형성으로 부착된 접착물질들의 화학적 성분 분석을 위하여 EDS 분석을 사용하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 DLC 코팅의 미시적 구조

Fig. 3 (a)와 (b)에 DLC 박막의 미시적 구조를 나타내었다. Fig. 3 (a)에는 Si웨이퍼에 Table 1의 조건으로 DLC를 코팅한 후 이의 단면을 TEM으로 분석한 것으로 Si bonding layer를 명확히 볼 수 있으며 또한 이들의 구조가 비정질임을 박막부분의 전자회절 패턴으로부터 이해할 수 있다.

한편 Fig. 3 (b)에서는 이들 DLC 코팅의 표면과 단면의 구조를 SEM으로 관찰한 결과를 나타내었다. 단면의 SEM구조로부터 본 PIBD법으로 코팅된 막의 미세구조는 일반적인 박막증착 과정에서 얻을 수 있는 원주상형의 구조^{13~15})에 비하여 훨씬 조밀한 형태의 구조를 가짐을 알 수 있으며 표면의

Morphology는 아주 우수함을 알 수 있었다.

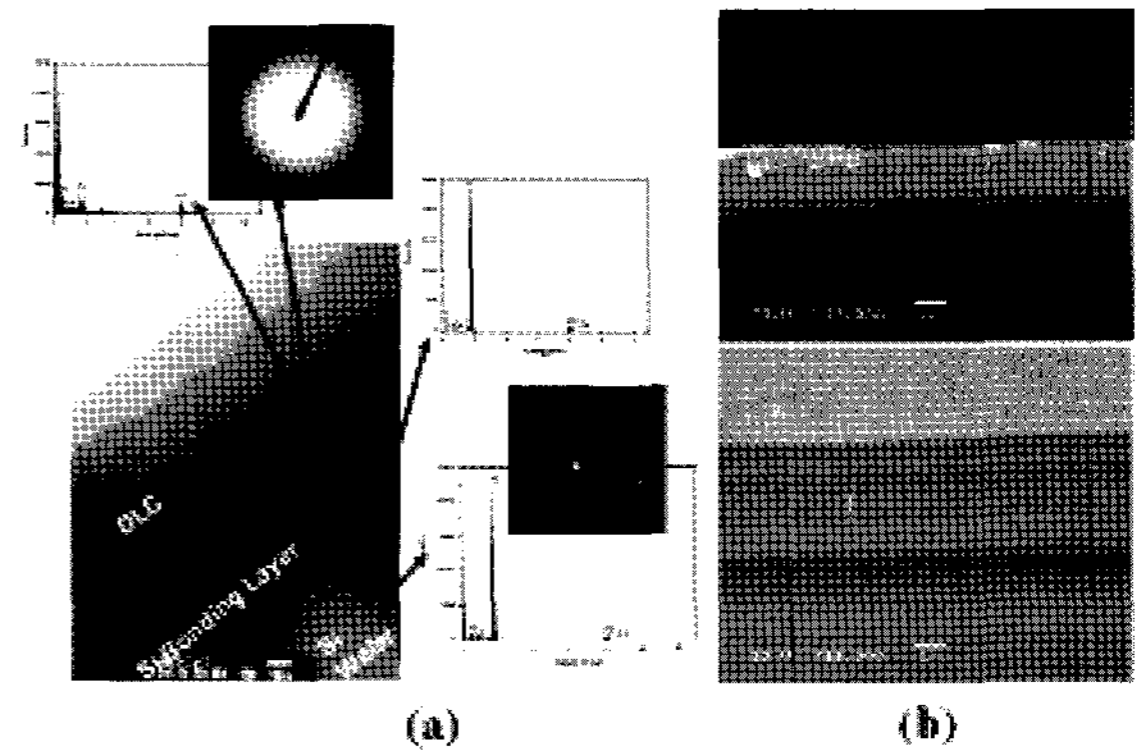


Fig. 3 TEM analysis of cross section of DLC film (a) and surface morphology and cross section structure of DLC (b)

코팅 층의 총 두께는 약1.3 μm이며 성분분석을 통하여 DLC 박막은 내부 코팅 층으로부터 코팅깊이의 증가에 따라 Si를 함유하고 있으며 이는 Ion beam의 연속된 주사에 의하여 Si가 확산되어 있음을 알 수 있다

3.2 고경도소결재 알루미늄 세라믹의 윤활특성

WC 초경공구재료는 알루미늄 세라믹과 유사한 표면적구조와 같은 소결재료에 속하기 때문에 고온마모 실험이 쉬운 알루미늄에 대한 트라이볼로지적인 거동을 살펴볼 필요가 있다.

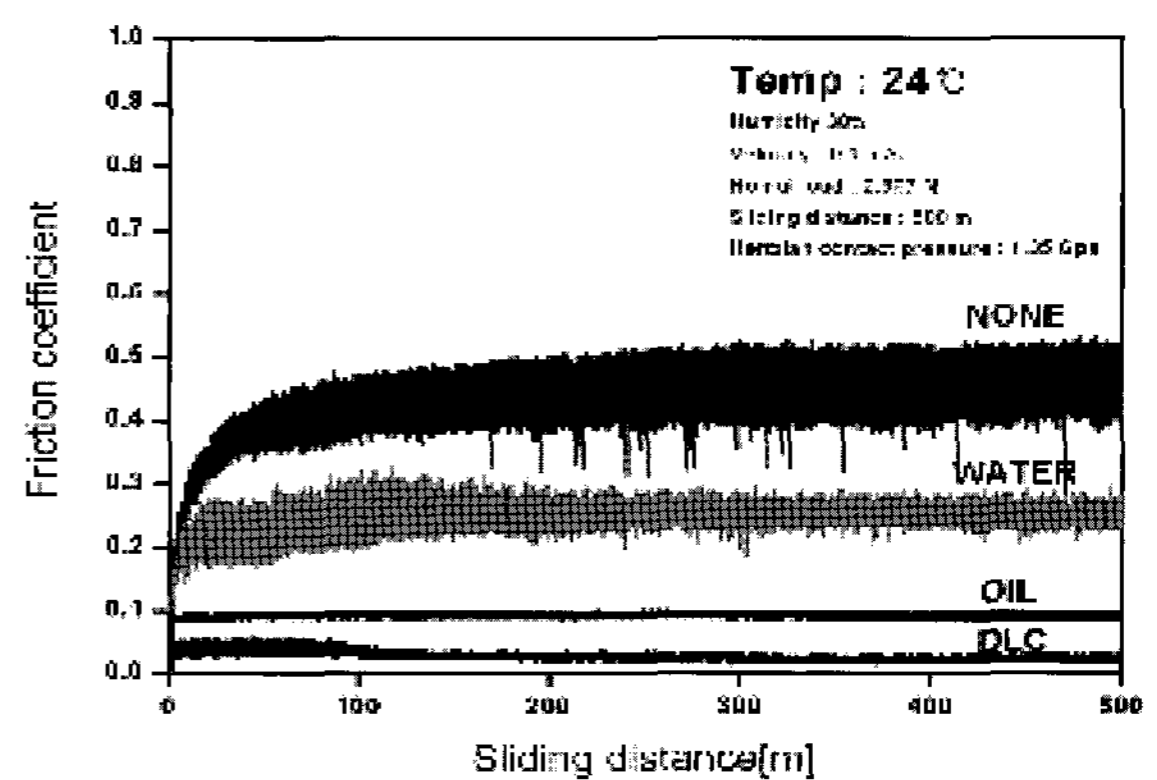


Fig. 4 Variation of friction coefficients of alumina on lubrications

Fig. 4에 알루미늄 세라믹에 대하여 상온에서 각종의 윤활제를 사용한 경우에 대하여 마찰계수를 나타내었다. 이로부터 초경질의 알루미늄 세라믹은 비록 상온이라 할지라도 적절한 윤활제가 없으면

마찰이 매우 크게 나타남을 알 수 있으며 물을 사용한 윤활에서조차 마찰력이 상당히 크게 나타나며 차량용 엔진 오일을 사용한 경우 마찰계수가 0.1에 가까운 수치로 나타나 여전히 마찰이 높음을 알 수 있다. 그러나 DLC 박막을 코팅한 경우 마찰계수가 약 0.05 이하로 낮아져 DLC 박막코팅이 고체윤활제로 사용되어질 수 있음을 알 수 있다.

이는 DLC라는 유사 다이몬드 박막과 세라믹 재료와의 사이의 마찰계수가 DLC박막에 함유된 다이아몬드상과 그래파이트상에 의하여 매우 낮아 졌기 때문이다. 그러나 이러한 DLC 박막이 Al재료의 절삭 가공 시 절삭 면에서 절삭공구가 처해지는 고온 고압하의 열악한 조건에서도 충분히 견딜 수 있을 만큼 고강도를 지니고 있는지를 이해하기 위해서는 고온 마모 실험과 절삭력 측정 실험이 필요하다.

3.3 DLC 박막의 고온 트라이볼로지 특성

Fig. 5은 DLC를 코팅한 #6 알100 °C, 400 °C에서의 고온마모실험하고 얻은 결과로서 마찰거리에 대한 마찰계수를 나타낸 것이다. Fig. 5에서 알 수 있는 바와 같이 DLC를 코팅한 알루미나 세라믹의 세라믹 볼에 대한 마찰은 상온에서는 마찰계수가 0.1에서 시작하지만 점차 안정화되어 평균 0.08의 값을 가진다.

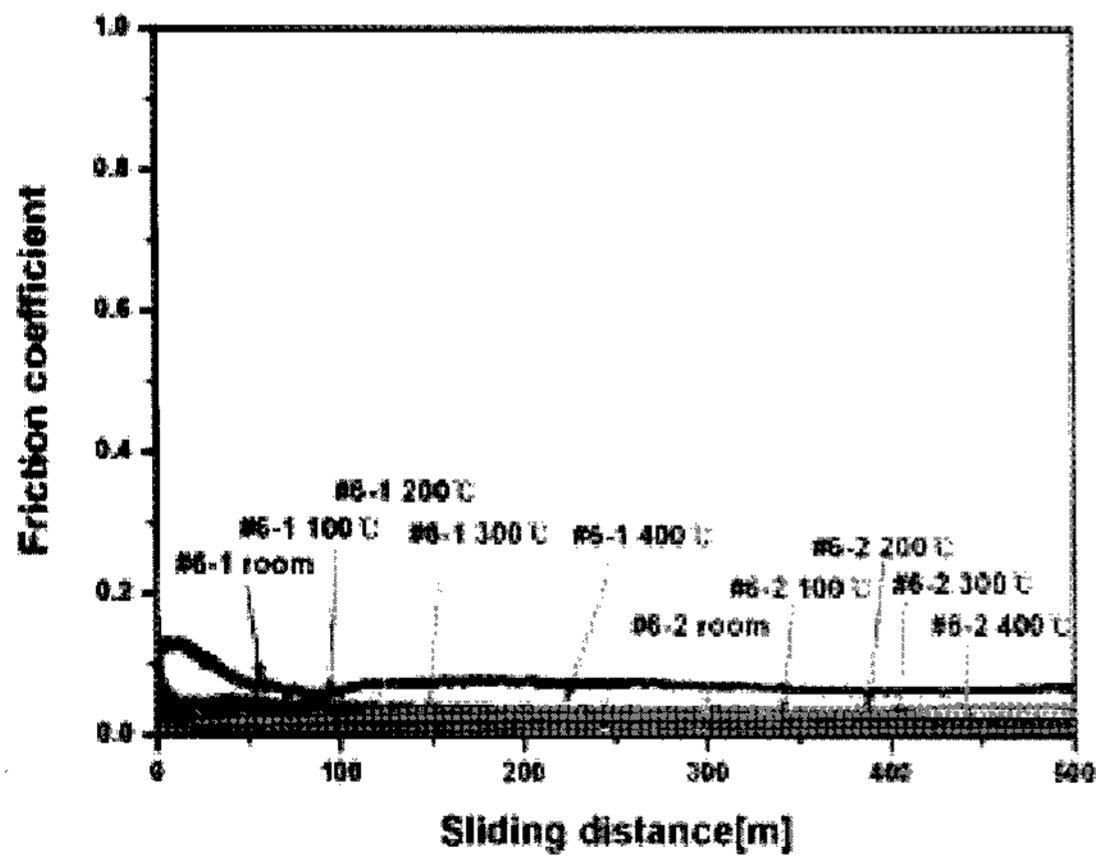


Fig. 5 Friction coefficients of DLC at high temperatures

이는 표면에 존재하였던 습도가 마찰열에 의하여 점차 소멸되어 마찰이 줄어드는 현상으로 판단된다. 반면에 DLC가 코팅된 시료들의 고온실험에서는 이들 값보다 다소 낮은 값들인 0.02 ~ 0.05를 나타낸다.

이들로 부터 DLC 박막에 의한 고온 윤활성이

400 °C의 고온과 1.3 GPa의 높은 Hertzian응력에서도 윤활성을 잃지 않아 DLC 박막이 400 °C까지의 고온 고체 윤활제로서 사용할 수 있음을 나타내고 있으며 이는 지금까지 알려진 DLC 박막들^(6~8 13 16) 가운데서도 뛰어난 성능을 나타내고 있다.

3.4 DLC 박막을 코팅한 WC의 절삭성능

DLC가 코팅된 절삭공구들의 절삭실험에서 얻은 결과를 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다.

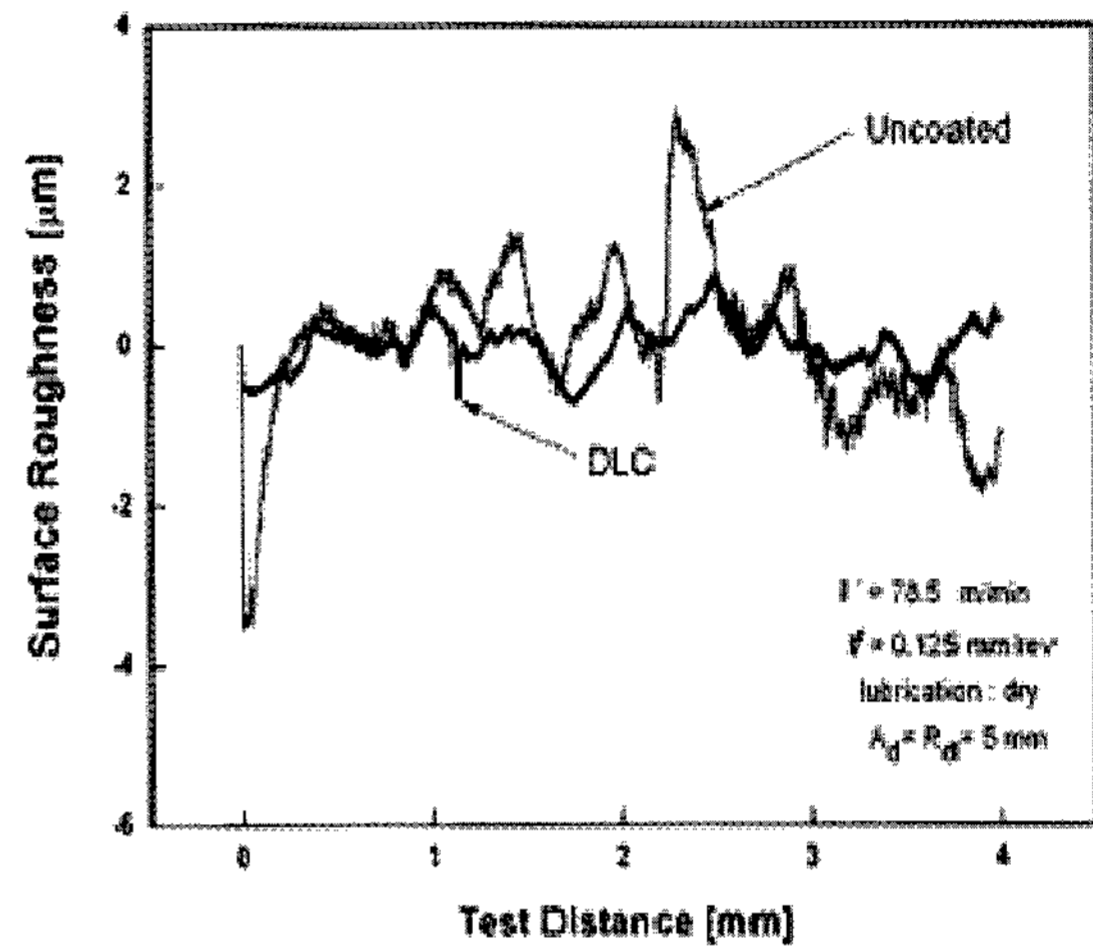


Fig. 6 Effect of DLC coating on roughness of dry machining Al6061 with coated and uncoated WC insert tips.

절삭 가공 후 가공물의 표면 거칠기를 나타낸 Fig. 6에서 보는 바와 같이 DLC 코팅으로 인하여 절삭 저항이 감소되어 절삭후의 표면 조도가 크게 향상되었음을 나타낸다.

즉 비코팅재의 가공면 조도가 최대 약 2 µm에 비하여 코팅재의 가공면은 1 µm이하로 나타나 현저한 차이를 나타낸다. 이러한 현상은 절삭속도를 높임에 따라 그 차이는 다소 감소하나 DLC 코팅재의 수명은 더욱 향상됨을 예비 실험으로도 알 수 있었다.

이는 또한 Fig. 7의 분석에서 절삭공구의 절삭면에 알루미늄 합금의 접착이 감소되어 야기되었음을 알 수 있다.

Fig. 7의 (a)는 비코팅재로서 절삭면에 피삭재인 Al이 많이 융착되어 있으나 이에 비하여 (b)는 Al의 접착보다는 작은 칩(Chip)의 형태로 약간 남아 있어 절삭에 큰 영향을 미쳤음을 알 수 있다.

1개의 공구 날을 사용한 절삭에서 생기는 플라잉

커터(Flying cutter)효과에 의한 큰 충격하중이 WC 모재 보다 경도가 높은 DLC 박막의 파손이 발견되었으나 이는 Fig. 7(a)의 비코팅재에서도 나타나 다량의 인서트 팁을 동시에 사용하는 생산현장의 적용에서는 불편이 없을 것으로 보인다. 이로부터 미루어 볼 수 있는 DLC coating재의 감소된 절삭저항은 DLC 자체의 낮은 마찰계수와 함께 DLC 박막의 알루미늄에 대한 불활성¹⁶⁻¹⁸⁾에 영향이 큰 것으로 생각된다.

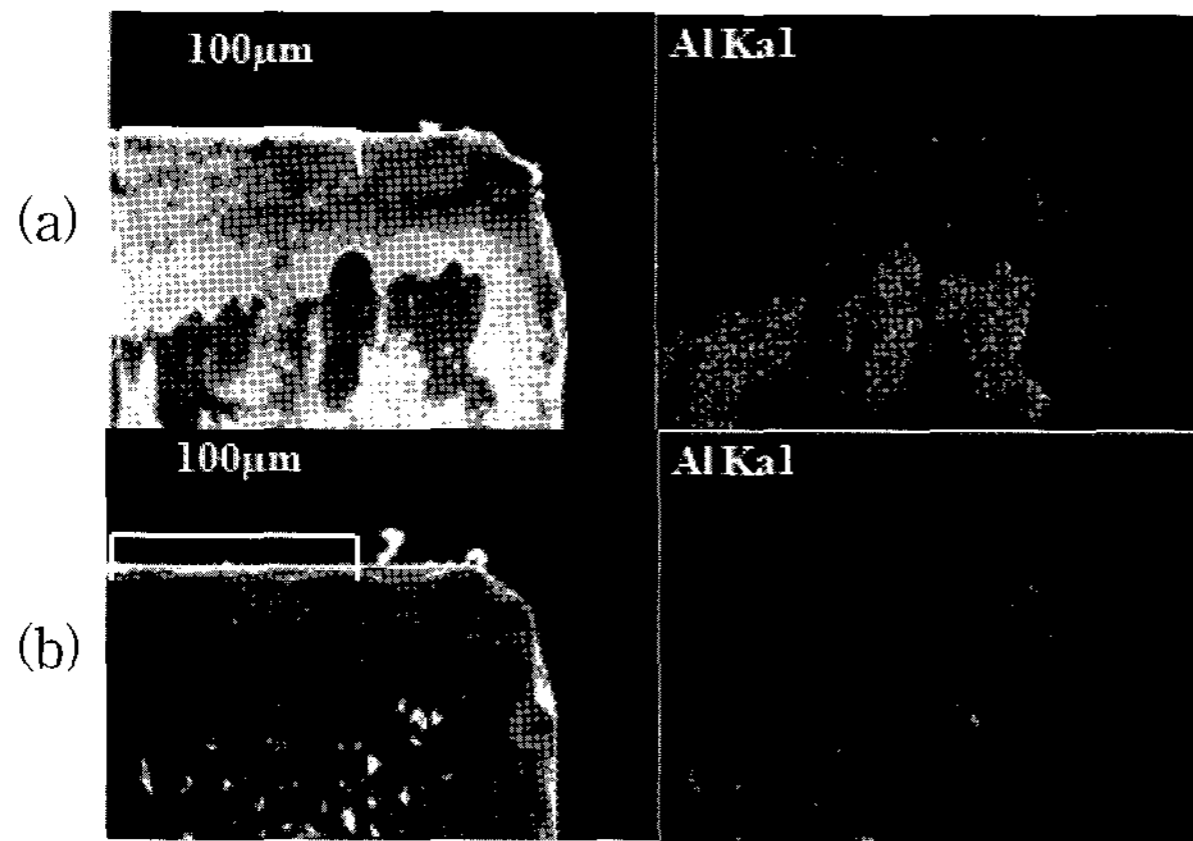


Fig. 7 Analysis of WC insert tip after dry machining of Al 6061, uncoated specimen (a) and DLC coated specimen (b).

공구표면에 최소화된 구성인선의 생성은 절삭 날을 날카롭게 유지시킬 수 있어 결과적으로 WC 절삭공구의 수명이 현저하게 향상되며 건식 절삭가공에서도 DLC 박막의 코팅에 의하여 DLC 박막을 코팅한 인서트 팁은 알루미늄 합금절삭에 있어 많은 장점이 있음을 알 수 있었다.

4. 결 론

알루미늄 합금의 건식 절삭가공을 위한 절삭공구용 윤활박막을 개발하기 위하여 Si 중간층과 Ar 스퍼터 세정+CH₄+C₂H₂ 증착조건의 PIIBD법으로 알루미늄과 WC시료에 DLC 박막을 코팅하였으며 절삭성능을 시험하기위해서 DLC 박막을 코팅한 알루미늄은 최고400 °C까지의 온도에서 마모실험을 하였고 DLC를 코팅한 WC시험편은 각각 Al 6061에 대한 절삭실험을 실시하였다.

이로부터 DLC 박막에 의한 윤활효과는 윤활유보다 낮은 0.05의 극히 낮은 마찰 계수 값을 나타내었으며 DLC를 코팅한 WC 인서트 팁을 건식절삭의

극심한 환경으로 Al 6061에 대하여 절삭실험을 한 결과 비코팅재에 비하여 절삭성능이 월등히 우수하였는데 이는 WC에 대한 Al재료의 구성인선을 크게 줄일수 있었던 것이 가장 큰 이유였으며 피삭 재료인 알루미늄과 고온 마모 및 마찰을 크게 줄일 수 있어 알루미늄절삭용 코팅재로서 적절히 사용될 수 있음을 알았다.

후 기

이 논문은 2005학년도 부경대학교 기성회 학술연구비(PK-2005-063)에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

1. K. Y. Lee and R. Wei, 2006, "Tribological characteristics of DLC-coated alumina at high temperatures", J. of Tribology, 128, ASME, pp. 711~717.
2. D. U. Brag, A. E. Diniz, G.W.A. Miranda and N. L. Coppini, 2002, "Using a minimum quantity of lubricant (MQL) and a diamond coated tool in the drilling of aluminum-silicon alloys", J. Mater. Process. Technol., 122, pp. 127~138.
3. J. F. Kelly and M. G. Cotterell, 2002, "Minimal lubrication machining of aluminum alloys", J. Mater. Process. Technol., 120, pp. 327~334.
4. M. Nouari, G. List, F. Girot and D. Coupard, 2003, "Experimental analysis and optimization of tool wear in dry machining of aluminum alloys", Wear, 255, pp. 1359~1368.
5. G. List et al, 2005, "Wear behavior of cemented carbide tools in dry machining of aluminum alloy", Wear, 259, pp. 1177~1189.
6. Mingjiang DaiU et al, 2000, "The cutting performance of diamond and DLC-coated cutting tools", Diamond and Related Materials, 9, pp. 1753~1757.
7. Koumei Baba and Ruriko Hatada, 2005, "Preparation and properties of metal-containing diamond-like carbon films by magnetron plasma source ion implantation", Surface & Coatings Technology, 196, pp. 207

- ~210.
8. Xia Lifang, Yan Zhaohui and Liao Jiaxuan, 2004, "Effects of intermediate layers on the tribological behavior of DLC coated 2024 aluminum alloy", *Wear*, 257, pp. 599~605.
 9. Haruyo Fukui et al, 2004, "Cutting performance of DLC coated tools in dry machining aluminum alloys", *Surface & Coatings Technology*, 187, pp. 70~76.
 10. M. Lahres, P. Müller-Hummel and O. Doerfel, 1997, "Applicability of different hard coatings in dry milling aluminum alloys", *Surface & Coatings Technology*, 91, pp. 116~121.
 11. K. Enke, 1999, "Dry machining and increase of endurance of machine parts with improved doped DLC coatings on steel, ceramics and aluminum", *Surface & Coatings Technology*, 116-119, pp. 488~491.
 12. T. C. S. Vandeveld et al., 1999, "Cutting applications of DLC, hard carbon and diamond films", *Surface & Coatings Technology*, 113, pp. 80~85.
 13. Won Jae Yang et al., 2005, "Microstructure and tribological properties of SiO_x/DLC films grown by PECVD", *Surface & Coatings Technology*, 194, pp. 128~135.
 14. J. Koskinen et al., 1998. "Microstructural changes in DLC films due to tribological contact", *Surface & Coatings Technology*, 108 - 109 , pp. 385~390.
 15. S. J. Bull, 1995, "Tribology of carbon coatings: DLC, diamond and beyond", *Diamond and Related Materials*, pp. 827-836.
 16. H. Ronkainen, S. Varjus, J. Koskinen and K. Holmberg, 2001, "Differentiating the tribological performance of hydrogenated and hydrogen-free DLC coatings", *Wear*, 249, pp. 260~266.
 17. V. Bursikoav, V. Navratil, L. Zajickova and J. Janca, 2002, "Temperature dependence of mechanical properties of DLC/Si protective coatings prepared by PECVD", *Material Science and Engineering*,. A324, pp. 251~254.
 18. E. Konca, et al., 2006, "Elevated temperature tribological behavior of non-hydrogenated diamond-like carbon coatings against 319 aluminum alloy", *Surface & Coatings Technology*, 200, pp. 3996~4005.